

УДК 537.876.4

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Т-МОД КООКСИАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ

И. В. ЗАВИСЛЯК, М. А. ПОПОВ

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
Украина, Киев, 01601, ул. Владимирская, 64/13*

Аннотация. Представлено строгое решение электродинамической задачи для волн T -типа в коаксиальном волноводе эллиптического сечения, полученное с использованием оригинальной модифицированной эллиптической системы координат. Преимуществом такого подхода являются удобные выражения для электродинамических характеристик линии передачи и простой переход к частному случаю волновода круглого сечения. Получены явные выражения для волнового сопротивления, передаваемой мощности и погонных потерь коаксиального эллиптического волновода с волнами T -типа, а также проанализированы их зависимости от размеров и формы поперечного сечения линии передачи. Приведенные графики зависимостей указанных характеристик от нормированных параметров, задающих форму и размеры волновода, позволяют подобрать геометрические размеры линии передачи исходя из требований заданного волнового сопротивления, предельной передаваемой мощности или потерь. Показано, что при больших эксцентриситетах энергия в волноводах с близкими размерами внутреннего и внешнего проводников и малым волновым сопротивлением, концентрируется вблизи фокусов, что позволяет использовать такие волноводы как основу для разработки эффективных зондов для радиоспектроскопических исследований.

Ключевые слова: коаксиальный волновод; эллиптическая система координат; волновое сопротивление; погонные потери; передаваемая мощность

ВВЕДЕНИЕ

Конфокальные электродинамические структуры эллиптического сечения находят разнообразное применение в устройствах и компонентах СВЧ диапазона, таких как волноводы, микрополосковые антенны, резонаторы, коаксиальные зонды [1–5], и в оптоволоконной технике [6, 7]. Интерес к эллиптической геометрии, обусловлен возможностью снятия азимутального вырождения собственных волн и колебаний, свойственного системам с круглым сечением, а также выделения и сохранения состояния поляризации распространяющихся волн.

В силу своих геометрических свойств эллиптические волноводы и резонаторы занимают промежуточное положение между аналога-

ми круглого сечения и планарными структурами. Так, в [8, 9] металлическая токоведущая полоска, окруженная экраном эллиптического сечения, рассматривалась как граничный случай эллиптического коаксиального волновода.

Конструкция эллиптических электромагнитных структур естественным образом обладает дополнительной степенью свободы, по сравнению с круглыми, что позволяет при расчетах характеристик волноводов добиваться требуемых значений электромагнитных параметров, таких как волновое сопротивление, передаваемая мощность, потери и т. д., не только изменяя относительные размеры внутреннего и внешнего экранов, но и варьируя форму их сечения, которая определяется через эксцентриситет или эллиптичность. Также следует

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bhattacharyya, A. K.; Shafai L. "Theoretical and experimental investigation of the elliptical annular ring antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 36, No 11, P. 1526-1530, 1988. DOI: [10.1109/8.9700](https://doi.org/10.1109/8.9700).
2. Xu, Y.; Ghannouchi, F. M.; Bosisio, R. G. "Theoretical and experimental study of measurement of microwave permittivity using open ended elliptical coaxial probes," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 40, No. 1, P. 143-150, 1992. DOI: [10.1109/22.108333](https://doi.org/10.1109/22.108333).
3. Sun, K.; Tranquilla, J. M. "Study of elliptical annular microstrip antenna using full Mathieu formulation," *Proc. Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.*, 28 June-2 July 1993, Ann Arbor, USA. IEEE, Vol. 2, P. 944-947. DOI: [10.1109/APS.1993.385193](https://doi.org/10.1109/APS.1993.385193).
4. Xiong, T.; Yan, R. "Propagation characteristics of confocal elliptical coaxial lines filled with multilayered media," *Progress in Electromagnetics Research Symp.*, 22-26 Aug. 2005, Hangzhou, China, P. 147-150. DOI: [10.2529/PIERS041207103750](https://doi.org/10.2529/PIERS041207103750).
5. Fanti, A.; Simone, M.; Deias, L. "Analysis and optimization of elliptic ridged waveguide with FDFD technique and PSO algorithm," *Appl. Computational Electromagnetics Soc. J.*, Vol. 31, No. 8, P. 860-866, 2016. URI: http://www.aces-society.org/includes/downloadpaper.php?of=ACES_Journal_August_2016_Paper_1&nf=16-8-1.
6. Antikainen, A.; Essiambre, R.-J.; Agrawal, G. P. "Determination of modes of elliptical waveguides with ellipse transformation perturbation theory," *Optica*, Vol. 4, No. 12, P. 1510-1513, 2017. DOI: [10.1364/OPTICA.4.001510](https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.001510).
7. Ip, E.; Milione, G.; Li, M.-J.; Cvijetic, N.; Kanonakis, K.; Stone, J.; Peng, G.; Prieto, X.; Montero, C.; Moreno, V.; Liñares, J. "SDM transmission of real-time 10GbE traffic using commercial SFP + transceivers over 0.5km elliptical-core few-mode fiber," *Optics Express*, Vol. 23, No. 13, P. 17120-17126. 2015. DOI: [10.1364/OE.23.017120](https://doi.org/10.1364/OE.23.017120).
8. Rozzi, T.; Pierantoni, L.; Ronzitti, M. "Analysis of the suspended strip in elliptical cross section by separation of variables," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 45, No. 10, P. 1778-1784, 1997. DOI: [10.1109/22.641728](https://doi.org/10.1109/22.641728).
9. Lee, J.-W.; Chen, J.-T. "A semianalytical approach for a nonconfocal suspended strip in an elliptical waveguide," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 60, No. 12, P. 3642-3655, 2012. DOI: [10.1109/TMTT.2012.2221138](https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2221138).
10. King, M.; Wiltse, J. "Coaxial transmission lines of elliptical cross section," *IRE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 9, No. 1, P. 116-118, 1961. DOI: [10.1109/TAP.1961.1144942](https://doi.org/10.1109/TAP.1961.1144942).
11. Alhargan, F. A.; Judah, S. R. "Mode charts for confocal annular elliptic resonators," *IEE Proc. - Microwaves, Antennas Propag.*, Vol. 143, No. 4, P. 358-360, 1996. DOI: [10.1049/ip-map:19960539](https://doi.org/10.1049/ip-map:19960539).
12. Navarro, R.; Boria, V. E.; Gimeno, B.; Coves, A.; Ferrando, M. "Full modal analysis of confocal coaxial elliptical waveguides," *IEE Proc. - Microwaves, Antennas Propag.*, Vol. 147, No. 5, P. 374-380, 2000. DOI: [10.1049/ip-map:20000737](https://doi.org/10.1049/ip-map:20000737).
13. Gutierrez-Vega, J. C.; Rodriguez-Dagnino, R. M.; Chavez-Cerda, S. "Attenuation characteristics in confocal annular elliptic waveguides and resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 50, No. 4, P. 1095-1100, 2002. DOI: [10.1109/22.993411](https://doi.org/10.1109/22.993411).
14. Changhong, L.; Long, L. "A new characteristic impedance perturbation method for finding attenuation constants," *Microwave Optical Technol. Lett.*, Vol. 32, No. 4, P. 243-245, 2002. DOI: [10.1002/mop.10143](https://doi.org/10.1002/mop.10143).
15. Golovach, G. P.; Popov, M. A.; Roussigne, Y.; Stashkevich, A. A.; Zavislyak, I. V. "Analytical theory of the dipole-exchange oscillations in long ferromagnetic nanowires of elliptical cross-section in a transverse external magnetic field," *JMMM*, Vol. 382, P. 252-264, 2015. DOI: [10.1016/j.jmmm.2015.01.077](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.077).
16. Попов, М. А. "Параметричне збудження паралельною накачкою поверхневих магнітостатичних ко-

ливань в поздовжньо намагніченому еліптичному циліндрі,” *УФЖ*, Т. 60, № 5, С. 452-457, 2015. URI: <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/60/5/600509p.pdf>.

17. Popov, M. A. “Equilibrium bi-domain configuration in cylindrical magnetic microparticles,”

Eur. Phys. J. B, Vol. 90, No. 3, P. 55-1-55-7, 2017. DOI: [10.1140/epjb/e2017-70748-9](https://doi.org/10.1140/epjb/e2017-70748-9).

18. Григорьев, А.Д. *Электродинамика и микро-волновая техника*. СПб.: Лань, 2007. 704 с.

Поступила в редакцию 30.03.2018

После переработки 04.09.2018